

高 等 学 校 教 材

工程材料与成形工艺基础 学习指导

温建萍 刘子利 主编



化学工业出版社

TB3/128

2007

高等学校教材

工程材料与成形工艺基础学习指导

温建萍 刘子利 主编



化学工业出版社

·北京·

全书工程材料学、材料成形工艺基础独立成篇。工程材料学部分主要介绍各章的学习重点、内容提要、总结与复习指导,重点章节的课堂讨论指导与示范,各章的复习思考题与自测题记参考答案和实验指导。材料成形工艺基础部分主要介绍各章的学习重点、内容提要及总结与复习指导,各章的复习思考题与自测题及参考答案。书末附录参照现用国家标准列出了常用工程材料的牌号、性能与用途的总结表,同时收录了碳钢的强度与硬度值的换算表及常用的技术名词中、英文对照表。

本书可作为普通高校、成人高校的机械类和近机类专业学生学习机械工程材料、金属材料学、金属材料与热处理、材料成形工艺基础等课程的辅助教材或研究生考试的辅导教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与成形工艺基础学习指导/温建萍,刘子利主编. —北京:
化学工业出版社, 1905. 6

高等学校教材

ISBN 978-7-122-00787-2

I. 工… II. ①温… ②刘… III. 工程材料-成形-工艺-高等学校-教
学参考资料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 103025 号

责任编辑: 杨 菁

装帧设计: 潘 峰

责任校对: 周梦华

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13¼ 字数 341 千字 2007 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

工程材料学、材料成形工艺基础是高等教育工科院校机械类和近机械类各专业学生必修的重要技术基础课程。工程材料学的主要任务是阐述各种常用工程材料的化学成分、加工工艺、组织结构、使用性能及实际应用之间的相互关系与内在规律,为工程结构、机械零件的设计、制造和正确使用提供有关合理选材、用材的必要理论指导和实际帮助。材料成形工艺基础是一门以研究制造金属机件加工工艺为主的综合性技术科学,它涉及机械制造从材料到热、冷加工各方面。因此,工程材料学、材料成形工艺基础是学习机械零件及设计等课程和机械类相关各专业课程所必不可少的先修课程之一。

为了帮助学生更好地掌握工程材料学、材料成形工艺基础课程课堂教学的重点内容,培养学生运用所学理论知识分析、解决实际问题的能力,达到本课程的教学目的,根据编者积累的教学经验和资料,在南京航空航天大学学生使用《〈工程材料学〉、〈材料成形工艺基础〉学习指导、习题》的基础上经过多年不断的修订补充,编写了这本学习指导教材。全书工程材料学、材料成形工艺基础独立成篇。工程材料学由五部分组成:第一部分为各章的学习重点与内容提要及总结与复习指导;第二部分为工程材料学重点章节的课堂讨论指导与示范;第三部分为各章的复习思考题与自测题;第四部分为各章的复习思考题与自测题参考答案;第五部分为实验指导。材料成形工艺基础包括三部分:第一部分为各章的学习重点与内容提要及总结与复习指导;第二部分为各章的复习思考题与自测题;第三部分为各章的复习思考题与自测题参考答案。书末附录参照现用国家标准编辑了常用工程材料的牌号、性能与用途的汇总表,同时收录了碳钢的强度与硬度值的换算表及常用的技术名词中、英文对照表。

本书可作为普通工科大专院校、成人高校机械类、近机类专业本、专科生学习机械工程材料、金属材料学、金属材料与热处理、材料成形工艺基础等课程的辅助教材或研究生考试的辅导教材。

本书由南京航空航天大学温建萍、刘子利主编,参加编写的有王少刚、陈文华、王蕾、苏新清老师。由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正,以便对教材内容不断总结和改进。

编者
2007年4月

目 录

第一篇 工程材料学

第一部分 学习重点与内容提要	1
绪论	1
第一章 材料的性能	3
第二章 金属的晶体结构	3
第三章 金属的结晶	5
第四章 金属的塑性变形与再结晶	5
第五章 合金的结构与二元合金相图	6
第六章 铁碳合金相图	8
第七章 钢的热处理	11
第八章 工业用钢	15
第九章 铸铁	22
第十章 有色金属及其合金	23
第十一章 其他工程材料	24
第十二章 机器零件的失效与选材	26
工程材料学总结与复习指导	33
第二部分 工程材料学课堂讨论指导	36
总述	36
课堂讨论一 铁碳相图	36
课堂讨论二 钢的热处理	37
课堂讨论三 合金钢与选材	39
第三部分 复习思考题与自测题	41
第一章 材料的性能	41
第二章 金属的晶体结构	41
第三章 金属的结晶	43
第四章 金属的塑性变形与再结晶	44
第五章 合金的结构与二元合金相图	47
第六章 铁碳合金相图	49
第七章 钢的热处理	52
第八章 工业用钢	57
第九章 铸铁	60
第十章 有色金属及其合金	62
第十一章 其他工程材料	63
第十二章 机器零件的失效与选材	65
工程材料学自测题一	69
工程材料学自测题二	70

第四部分	复习思考题与自测题参考答案	74
第一章	材料的性能	74
第二章	金属的晶体结构	75
第三章	金属的结晶	78
第四章	金属的塑性变形与再结晶	79
第五章	合金的结构与二元合金相图	81
第六章	铁碳合金相图	83
第七章	钢的热处理	87
第八章	工业用钢	92
第九章	铸铁	96
第十章	有色金属及其合金	98
第十一章	其他工程材料	99
第十二章	机器零件的失效与选材	101
	工程材料学自测题一参考答案	104
	工程材料学自测题二参考答案	106
第五部分	实验	108
实验一	金属材料的力学性能实验	108
实验二	塑性变形与再结晶	116
实验三	光学金相显微镜的使用及铁碳合金平衡组织观察	118
实验四	碳钢的淬火与回火	121

第二篇 材料成形工艺基础

第一部分	学习重点与内容提要	124
绪论		124
第一章	铸造	125
第二章	锻压	129
第三章	焊接	132
第四章	毛坯成形方法选择	136
	材料成形工艺基础总结与复习指导	137
第二部分	复习思考题与自测题	139
第一章	铸造	139
第二章	锻压	144
第三章	焊接	147
第四章	毛坯成形方法选择	151
	材料成形工艺基础自测题	151
第三部分	复习思考题与自测题参考答案	154
第一章	铸造	154
第二章	锻压	159
第三章	焊接	163
第四章	毛坯成形方法选择	166

附 录

附表 1	碳素结构钢的牌号、成分和力学性能	169
附表 2	优质碳素结构钢的牌号、成分和性能	170
附表 3	碳素工具钢的牌号、成分、性能及用途	171
附表 4	一般工程用铸造碳钢的牌号、成分、性能和用途	172
附表 5	低合金高强度结构钢的牌号、化学成分和力学性能	173
附表 6	常用渗碳钢的化学成分、热处理、力学性能和用途	174
附表 7	常用调质钢的化学成分、热处理、力学性能和用途	175
附表 8	常用弹簧钢的化学成分、热处理、力学性能和用途	177
附表 9	轴承钢的化学成分、热处理及用途	178
附表 10	常用易切削结构钢的牌号、化学成分及力学性能	178
附表 11	常用合金量具刃具用钢的牌号、化学成分、热处理规范及用途	179
附表 12	常用高速钢的热处理制度、主要特性及用途举例	180
附表 13	常用合金冷作模具钢的热处理、主要特性和用途举例	182
附表 14	常用合金热作模具钢的热处理、主要特性和用途举例	183
附表 15	珠光体型热强钢（合金结构钢）的力学性能、主要特性和用途举例	184
附表 16	马氏体型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途	186
附表 17	铁素体型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途	187
附表 18	奥氏体型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途	187
附表 19	铁基高温合金的特性及用途	189
附表 20	灰铸铁的牌号、力学性能及应用	190
附表 21	球墨铸铁的牌号、基体组织、力学性能和应用	190
附表 22	常用蠕墨铸铁的性能特点与用途	190
附表 23	常用可锻铸铁的性能特点和用途	191
附表 24	变形铝及铝合金牌号表示方法——四位字符体系牌号命名方法	191
附表 25	变形铝合金的牌号、成分、性能与用途	192
附表 26	铸造铝合金的力学性能与用途	193
附表 27	常用黄铜的牌号、成分、性能与用途	194
附表 28	常用钛合金的牌号、成分、性能与用途	195
附表 29	低碳钢硬度与强度换算值表	196

常用技术名词中、英文对照	198
--------------------	-----

第一篇 工程材料学

第一部分 学习重点与内容提要

绪 论

一、本章重点

学习本课程，要紧紧抓住“材料的化学成分→加工工艺→组织结构→性能→应用”之间的相互关系及其变化规律这个“纲”。

绪论课讲授的重点是本课程在机械设计与制造中的重要性、研究对象，课程的性质、主要内容概况及与专业的关系等。初步了解机械工程材料的分类。使学生在课程开始，对工程材料学课程的特点就有足够的了解与认识，以便学生能有的放矢地制定自己的学习计划、选择适合自己的科学学习方法。

二、内容提要

（一）工程材料的发展与分类

材料是人类文明的标志，人类进化的里程碑。人类历史的发展过程本身就是一部材料发展的历史，石器时代、青铜器时代、铁器时代均标志着一个相应的经济发展历史时期。当今世界，材料、能源与信息被誉为现代化生产的三大支柱。而材料又是能源与信息发展的物质基础。材料，特别是新型材料，是发展高科技的先导和基石。如图 1-1-1 所示，表明了材料发展的历程，图中横坐标为年代、时间为非线形的，纵坐标为相对重要性。可以看出金属材料、聚合物材料、陶瓷材料和复合材料在纵坐标上所占比例的大小，以此来衡量其相对重要性。由图 1-1-1 可见，从 20 世纪 50 年代金属材料占绝对优势的分布情况到 21 世纪，目前已形成四大类工程材料平分秋色的格局。

工程材料的种类繁多，有各种各样的分类方法。若按化学成分与结合键特点，可分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类，如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 材料按化学成分与结合键特点分类

材料名称	化学成分	结 合 键
金属材料(黑色金属、有色金属)	金属+金属或非金属	金属键
高分子材料	C、H 化合物	共价键+范德华键
陶瓷材料	金属+非金属化合物	离子键+共价键
复合材料	两种或两种以上材料的组合	混合键

（二）课程的性质及与专业的关系

① 工程材料学是一门重要的技术基础课程，它主要是应用金相学、物理学、化学、冶金学和电子计算机等学科理论和实验的最新成就，即工程材料学是建立在实验基础之上而又与工业实践紧密结合的一门技术基础课程。其课程内容以定性描述为主，具体表现为“三多”：讲授内容中名词、概念、术语“多”，定性描述、经验性总结“多”，需记忆性的内容、规律“多”。

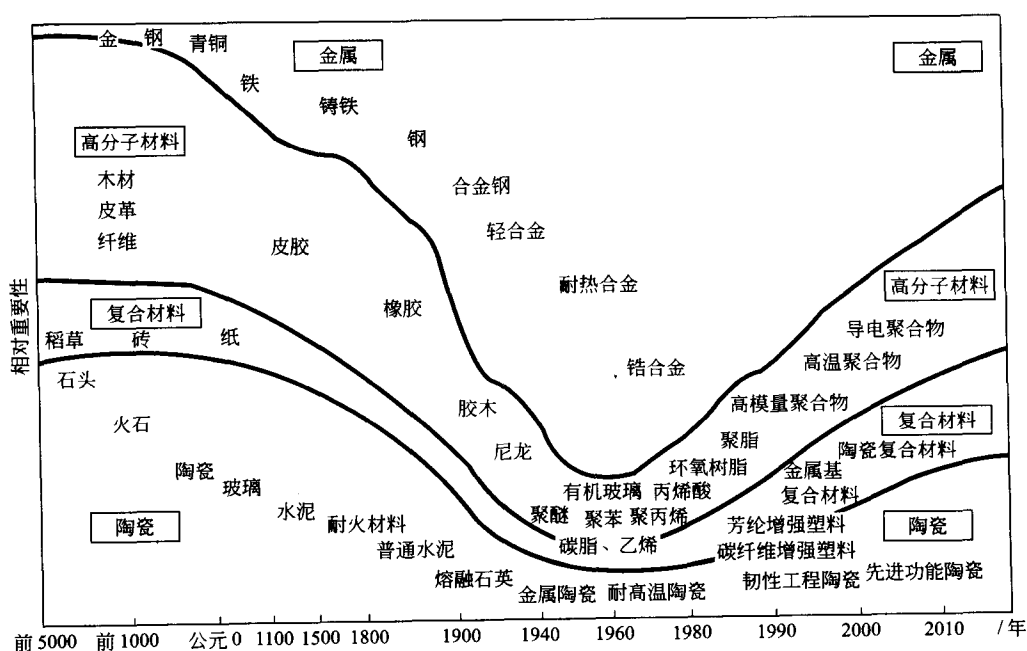


图 1-1-1 材料发展的历程示意图

② 作为一名机械工程技术人员，时时处处都会遇到有关材料方面的问题。无论设计一台机器设备、机械零件，还是改革、加工一套工夹具，都将面临材料的选择、应用与零件加工工艺路线的制定等问题，这一切都涉及材料方面的问题。工程技术人员要具备两方面的材料学知识：其一是应了解材料的成分（组成）、结构、工艺及外界条件（如载荷、温度、环境介质等）改变时对其性能的影响；其二是应掌握各种工程材料（重点是金属材料）的基本特性和应用范围。而工程材料学课程正是为了实现这一要求设置的。

③ 学好工程材料学，为学习专业课程奠定坚实的基础。

（三）本课程的研究对象，学习目的及主要内容

1. 研究对象

工程材料（以研究机械工程结构材料为主），是研究各种固体材料的成分（组成）、加工工艺、组织结构、性能和应用之间的相互关系及其变化规律的一门科学。

2. 学习目的

- ① 获得有关材料与材料科学方面的基本理论知识；
- ② 掌握强化工程材料性能的途径、基本原理与方法；
- ③ 熟悉常用工程材料的各类特点；
- ④ 使学生具有合理选用工程材料并妥善安排其加工工艺路线的初步能力。

3. 主要内容

工程材料学主要包括材料基础（材料的力学性能、金属的晶体结构与结晶、二元合金相图、金属的塑性变形与再结晶等）、钢的热处理、常用工程材料（碳钢、合金钢、有色金属及合金、高分子材料、无机非金属材料、复合材料）和机械零件的失效与选材四部分。

三、教学参考资料

- [1] 张代东. 机械工程材料应用基础. 机械工业出版社. 2001. 3.
- [2] 郑新明. 工程材料. 第2版. 清华大学出版社. 1994. 2.
- [3] 王焕庭. 机械工程材料. 大连理工大学出版社. 1993. 10.

[4] 王特典. 工程材料. 东南大学出版社. 1995. 12.
[5] 翟封祥, 尹志华. 材料成形工艺基础. 哈尔滨工业大学出版社. 2002. 9.
[6] 齐乐华. 工程材料及成形工艺基础. 西北工业大学出版社. 2001. 12.

第一章 材料的性能

一、本章重点

- ① 对表征材料的力学性能指标, 包括 σ_b 、 σ_s 、 σ_e 、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_{-1} 、 δ 、 δ_5 、 φ 、 α_k 、 HB 、 HRC 、 HV 、 E 要认识, 并能解释其物理意义。其中重点是 σ_b 、 σ_s 、 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 α_k 、 HB 、 HRC ;
- ② 掌握布氏硬度和洛氏硬度各自的优缺点、相互关系和应用场合。

二、内容提要

材料的性能是指材料的使用性能和工艺性能。材料的使用性能又包括力学性能和物理化学性能。材料的性能指标是设计、制造零件和工具的重要依据。对于一般的机械工程材料应重点了解其力学性能, 其次是工艺性能。常用的力学性能指标及说明见表 1-1-2。

表 1-1-2 常用的力学性能指标及说明

力学性能	性能指标		说明
	符 号	名 称	
强度	σ_b	抗拉强度 (强度极限)	试样在拉断前承受的最大应力值
	σ_s	屈服强度 (屈服极限)	材料开始产生屈服现象的应力
	$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度 (条件屈服极限)	对于没有屈服现象的材料, 工程中规定发生试样标距长度 0.2% 的残余塑性变形量时所对应的应力值
	σ_{-1}	疲劳强度 (疲劳极限)	材料经受多次(钢为 10^7 次、有色金属为 10^8 次)对称循环交变应力作用而不发生破坏的最大应力值
塑性	$\delta(\delta_{10})\%$ $\delta_5\%$	延伸率	试样拉断后, 标距长度的增加量与原标距长度的百分比, 试样长度与直径之比为 5 时, 用 δ_5 表示
	ψ	断面收缩率	试样拉断处, 横截面积减缩量与原横截面积的百分比
硬度	HB	布氏硬度	使淬火钢球压入材料表面, 在单位压痕球面积上受的载荷。一般用于测量 $HB < 450$ 较软材料毛坯、半成品的硬度
	HRC	洛氏硬度	以 120° 角金刚石压头压入材料表面, 按压痕深度衡量硬度值。可直接从硬度计表盘上读数, 一般用于经过淬火的钢件等
	HV	维氏硬度	一般用于测量经表面处理的表面层硬度或薄件的硬度
	HM	显微硬度	用于测量材料中各种相和组织的硬度
韧性	α_k	冲击韧性 (冲击值)	一次冲断试样缺口处单位截面积上所消耗的功
断裂韧性	K_I	断裂韧性	在断裂力学中, 用来研究材料抗裂纹扩展能力的性能指标。
弹性	σ_e	弹性极限	材料承受最大的弹性变形时所对应的应力值
	E	弹性模量	弹性范围内应力与应变的比值, 表征金属对弹性变形的抗力

第二章 金属的晶体结构

一、本章重点

- ① 晶体结构的基本概念, 三种典型晶格 (体心立方、面心立方和密排六方) 的原子排列规律及基本参数;

- ② 立方晶系中晶面指数和晶向指数确定方法，原子密排面和密排方向；
- ③ 实际金属中的三类晶体缺陷（点、线、面缺陷）。

二、内容提要

金属材料是目前应用最广泛的工程材料。金属材料的结合键主要是金属键。金属材料都是晶体。

（一）固态金属的特性

- ① 良好的导电、导热性；
- ② 良好的塑性；
- ③ 不透明、有光泽；
- ④ 正的电阻温度系数。

金属的这些特性都是由金属键的性质决定的。

（二）晶体的特性与结构

晶体内部的原子（或离子）在三维空间有规则排列，使之具有：①规则的几何外形；②确定的熔点；③各向异性。而非晶体中，原子是散乱排列的，故不具备以上特性。

X射线结构分析表明，绝大多数金属均为体心立方、面心立方和密排六方这三种典型的结构，其基本的结构参数见表 1-1-3。

表 1-1-3 三种典型金属晶体结构小结

金属名称	晶格类型	晶格特征	晶胞中原子数	原子半径	配位数	致密度/%
Cr、Mo、W、V α -Fe δ -Fe	体心立方 bcc	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	68
Al、Cu、Ni γ -Fe	面心立方 fcc	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	74
Mg、Cd、Zn、Be	密排六方 hcp	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$	6	$a/2$ ($c/a=1.633$)	12	74

（三）金属晶体中的晶面与晶向

金属的许多性能及金属中发生的许多现象都与晶面和晶向有密切关系。因此，分析和表达晶格中晶面和晶向的特点是十分重要的。

立方晶系中晶面指数和晶向指数的确定方法；晶面和晶面族，晶向和晶向族，晶面和晶向上的原子密度等概念很重要。

bcc 中原子的密排面是 $\{110\}$ ，密排方向是 $\langle 111 \rangle$ 。

fcc 中原子的密排面是 $\{111\}$ ，密排方向是 $\langle 110 \rangle$ 。

（四）晶体缺陷与性能

在实际金属晶体中，不可避免地存在着各种缺陷，如点缺陷、线缺陷和面缺陷。它们的共同特点是破坏了晶格的完整性，造成晶格畸变，并直接影响晶体的性能。

（1）点缺陷 主要有晶格空位和间隙原子两种，它们通过对原子移动的微观过程的影响而影响金属的性能。

（2）线缺陷 主要形式是两类位错。它使得金属滑移容易进行，从而降低了金属的强度。但当金属中的位错密度很高时，由于位错运动阻力的增大，金属的强度反而提高。

（3）面缺陷 主要形式是晶界和亚晶界，它们除提高金属的塑性变形抗力、提高强度与硬度外，还能使变形分散在各晶粒内部，因此提高塑性与韧性。

（五）金属中的扩散

扩散是指原子超过平均原子间距的迁移现象。影响扩散的主要因素是温度、结构、表面及晶体缺陷。扩散影响金属内部组织转变的微观过程，从而影响其性能。扩散在金属的固态

转变中也有十分重要的意义。

第三章 金属的结晶

一、本章重点

- ① 过冷度的概念，过冷度对结晶过程的影响规律；
- ② 结晶过程中形核和长大的概念，自发形核、非自发形核、树枝状长大；
- ③ 获得细晶粒的方法。

二、内容提要

金属结晶的基本规律是研究金属内部组织转变的基础。结晶过程中形核长大的概念及结晶的规律，在固态相变中也具有普遍意义。

结晶过程的推动力是液相和固相之间要有自由能差 (ΔF)，即结晶过程需要过冷。过冷是金属结晶的必要条件。结晶包括形核和长大两个过程。结晶的结果是形成由许多晶粒（相互间位向不同的单晶体）所组成的多晶体物质。由于细晶粒材料具有较好的常温力学性能，因而细化晶粒就成为结晶过程中控制组织以提高使用性能的一个重要手段。

结晶过程中，细化金属晶粒的方法主要有：

1. 增大冷却速度

冷却速度越大，过冷度越大，结晶过程的推动力就越大，形核速率 N 和长大线速度 G 均增大，但 N 比 G 增大得快。在实际金属的过冷范围内，控制 N/G 这个比值，就可以控制结晶后晶粒的大小（即晶粒度）。因此可以通过增大过冷度达到细化晶粒的目的。

2. 变质处理

在非自发形核条件下，可以按“结构相似、大小相当”的原则，利用杂质或加入变质剂，以增加晶核数量或阻碍晶核长大，达到提高形核率、控制晶核长大、细化晶粒的目的。

3. 附加振动

金属结晶时附加振动或搅拌，使成长中的枝晶破碎。破碎的枝晶尖端起到晶核的作用，使形核率增加，从而使晶粒细化。

第四章 金属的塑性变形与再结晶

一、本章重点

- ① 塑性变形的滑移机制，多晶体塑性变形的特点；
- ② 加工硬化的本质及实际意义；
- ③ 回复、再结晶的概念及应用，影响再结晶后晶粒大小的因素；
- ④ 冷、热加工的区别。

二、内容提要

塑性变形是金属在外力作用下表现出来的一种行为。塑性变形不仅改变金属的外形，而且使金属内部组织和结构发生相应变化。经塑性变形后的金属在随后的加热过程中，内部组织也发生一系列变化，这些都对性能有明显的影响。

（一）塑性变形的机制

单晶体金属塑性变形的的基本方式是滑移和孪生。在滑移时，实际测定的滑移应力要比理论计算值小 $3\sim 4$ 数量级，这种差异是位错运动造成的。

滑移的机制是在分切应力作用下，位错沿滑移面上的滑移方向运动，造成晶体的一部分相对于另一部分的滑动位移。滑移面和滑移方向是晶格中的原子密排面和密排方向，一个滑移面和其上的一个滑移方向构成一个滑移系。滑移系越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性就越好。滑移方向对滑移所起的作用比滑移面大，所以 fcc 金属比 bcc 金属的塑性更好。

多晶体塑性变形时，每个晶粒内的变形与单晶体是一样的。但由于多晶体是由许多位向不同的小单晶体组成的，在切应力的作用下，滑移首先在软位向的晶粒中发生，其次是较软位向、硬位向。变形的晶粒总会受到周围不同位向晶粒的约束，使变形抗力增加。另外，晶界处原子排列紊乱，晶格畸变大，所以晶界的存在也会增加塑性变形抗力。晶界越多，金属的变形抗力就愈大，金属的强度就愈高。这就是为什么晶粒愈细，晶界总面积愈多，金属的强度就愈高的原因。

金属的晶粒愈细，不仅强度高，而且塑性也好。这是因为晶粒细，单位体积中的晶粒数目愈多，变形可分散在更多的晶粒内产生均匀的变形，不至于造成局部的应力集中而使裂纹过早的产生和发展。

(二) 塑性变形时组织和性能的变化

塑性变形造成晶格歪扭、晶粒变形和破碎，出现亚结构，甚至形成纤维组织。当变形量很大时，还会产生变形织构现象。当外力去除后，金属内部还存在残余内应力。

更为重要的是塑性变形使位错密度增加，从而使金属的强度、硬度增加，而塑性、韧性下降，即产生加工硬化。

(三) 变形金属在加热时组织和性能的变化

变形金属被加热时，随加热温度的升高，将发生回复、再结晶与晶粒长大等过程。再结晶后，金属形成新的无畸变的并与变形前相同晶格的等轴晶粒，同时位错密度降低，加工硬化现象消失，金属性能全面恢复到变形前的水平。

再结晶的开始温度主要取决于变形度。变形度越大，再结晶开始温度越低。大变形度 (70%~80%) 的再结晶温度与熔点的关系为

$$T_{\text{再}} \approx 0.4 T_{\text{熔}} (\text{K})$$

再结晶后的晶粒大小与加热温度和预先变形度有关。加热温度越低或预先变形度越大，其再结晶后晶粒越细。但要注意临界变形度的情况，对于一般金属，当变形度为 2%~10% 时，由于变形很不均匀，会出现晶粒的异常长大，导致性能急剧下降。

(四) 金属的冷加工和热加工

在金属学上，冷加工和热加工不是根据变形时金属是否加热，而是根据金属的再结晶温度来区分的。在再结晶温度以下的塑性加工为冷加工；在再结晶温度以上的塑性加工为热加工。

金属热加工的特点是不显示加工硬化现象，变形后获得再结晶组织。金属冷加工的特点是有加工硬化现象，变形后获得加工硬化组织。实际上，金属热加工时，同时存在着加工硬化和再结晶，只是加工硬化现象一出现马上被再结晶消除了。但是，在热加工过程中，如果出现加工硬化，甚至使零件开裂。这就是为什么高合金钢不能在高速锤上锻造的原因。

热加工显著改善金属的组织 and 性能，并形成热纤维组织（或称“流线”），使金属的力学性能特别是塑性和韧性具有明显的方向性。因此，热加工时应该力求使工件流线分布合理。

第五章 合金的结构与二元合金相图

一、本章重点

① 固溶体和金属间化合物的形成条件，结构特点与性能特点。

② 匀晶转变过程及特点。

固溶体结晶（匀晶转变）的特点是：

① 在一定的过冷度下，通过形核、长大两个过程进行结晶；

② 变温进行；

③ 结晶过程，两相成分发生变化；

④ 在两相区，两相的质量比符合杠杆定律；

⑤ 快冷时易出现枝晶偏析。

③ 杠杆定律及其应用。杠杆定律表示平衡状态两个平衡相的质量之间的关系，可利用它来计算两个平衡相分别占总合金的质量百分数，即各相的相对质量，亦可用它来确定组织中各组织组成物的相对质量。在运用杠杆定律时要注意以下几点：

① 只适用于平衡状态；

② 只适用于两相区；

③ 杠杆的长度为两平衡相的成分点之间的距离，杠杆的支点为合金成分，杠杆的位置由所处的温度决定。

④ 共晶转变特点，共晶相图中典型合金的结晶过程。

⑤ 弄清组织与相的概念与关系。

二、内容提要

由于合金具有强度高、硬度高、韧性好、耐磨、耐蚀、耐热等优良性能，因此在工程上使用的金属材料绝大多数是合金。二元合金是最简单、最基本的合金。

本章讲述了两个问题：一是合金的结构；二是二元合金相图。

（一）合金的结构

1. 固溶体与金属间化合物

固态合金的相结构包括固溶体与金属间化合物两种。

固溶体是合金结晶时所形成的晶格结构与合金的某一组元（溶剂）的晶格完全相同的固相。固溶体分为间隙固溶体和置换固溶体。固溶体的性能特点是：强度、硬度低，塑性、韧性好。通过溶入某种溶质元素形成固溶体，金属强度、硬度升高的现象称为固溶强化。固溶强化的产生是由于溶入溶质元素后，溶剂晶格产生畸变，使位错运动时所受到的阻力增大的缘故。固溶强化是金属材料的一个重要强化途径，因为它使金属材料的强度、硬度提高的同时，塑性韧性降低较少。但是，通过单纯的固溶强化所达到的最高强度指标仍然有限，常不能满足结构材料的要求。因而需要在此基础上进行其他强化处理。如经冷塑性变形引起的加工硬化，在固溶体基础上引入硬而耐磨的物质—金属间化合物。

金属间化合物是合金结晶时所形成的晶格结构与合金各组元的晶格结构均不相同的固相。它一般具有复杂的晶格、熔点高、硬而脆。当合金中出现金属间化合物时，通常能提高合金的强度、硬度及耐磨性，但会降低合金的塑性和韧性。金属间化合物的种类很多，按其形成条件可分为正常价化合物、电子化合物和间隙化合物。

2. 组织与相的关系与区别

相是按其物质的化学成分和晶体结构的基本属性来划分的。“相”实质上是晶体结构相同的状态。相是指材料中结构相同、化学成分及性能均一的组成部分，相与相之间有界面分开。因此，凡是化学成分相同，晶体结构与性能相同的物质，不管其形状是否相同，不论其分布是否相同，统称为一个相。

组织一般是指是用肉眼或在显微镜下所观察到的材料内部所具有的某种形态特征或形貌

图像，实质上它是一种或多种相按一定方式相互结合所构成的整体的总称。组织是显微尺度，结构是原子尺度。相构成了组织，组织决定了性能，这是一个重要的观点。

合金的组织是由单相固溶体或化合物组成，也可由一个固溶体和一个化合物或两个固溶体和两个化合物等组成。正是由于这些相的形态、尺寸、相对数量和分布的不同，才形成了各种各样的组织，即组织可由单相构成，也可由多相构成。组织是材料性能的决定因素。在相同的条件下，不同的组织对应着不同的性能。

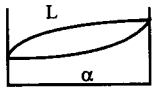
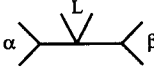
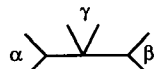
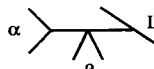
相组分（相组成物）与组织组分（组织组成物）是人们把在合金相图分析中出现的“相”称为相组分，出现的“显微组织”称为组织组分。实际上相组分就表示“相”，组织组分就表示“组织”。

（二）二元合金相图

合金相图是合金成分、温度与合金系所处状态间关系的简明图解。它反映了合金系在给定条件下的相平衡关系，是研究相与组织转变规律的重要工具。

与纯金属不同的是，在二元合金系中，随着组成元素加入量的变化，合金中的相和组织也要发生相应改变，根据其组织转变规律及性能特征来区分相图，并确定反应类型，归纳如表 1-1-4 所示。

表 1-1-4 二元合金相图

相图类型	图形特征	转变式	说 明
匀晶转变		$L \rightarrow \alpha$	一个液相经过一个温度范围转变为一种固相
共晶转变		$L \xrightarrow{T} (\alpha + \beta)$	恒温下，由一个液相 L 同时结晶出两个不同成分的固相 α 和 β ，构成机械混合物（称共晶体）
共析转变		$\gamma \xrightarrow{T} (\alpha + \beta)$	恒温下，由一个固相同时结晶出两个不同成分的固相 α 和 β ，构成机械混合物（称共析体）
包晶转变		$\alpha + L \xrightarrow{T} \beta$	恒温下，由液相和一个固相 α 相互作用生成一种新的固相 β

在对各类相图的认识和应用中，要特别注意区分各种相与组织，分析典型合金的结晶过程，画出结晶过程示意图，并应用杠杆定律计算平衡状态下相与组织的相对量。

第六章 铁碳合金相图

一、本章重点

① 熟练掌握铁碳合金相图的全貌，要能默画出铁碳合金相图，并能标出图上的特性点（G、C、E、F、P、S）、线（ECF、PSK、GS、ES）的温度和成分，能填上各区域的相和组织的组成。

② 画冷却曲线，分析典型铁碳合金的结晶过程，应用杠杆定律计算在室温下平衡组织中的相和组织组成物在整个合金中占的质量百分数，特别是钢的部分。

③ 弄清铁碳合金的成分、组织与性能之间关系，即随含碳量的变化，其组织和性能的变化规律（见图 1-1-2）。

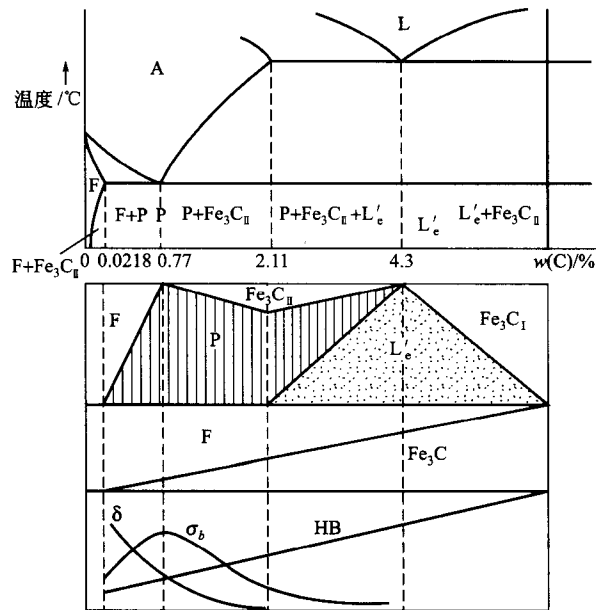


图 1-1-2 铁碳合金的成分、组织与性能关系图

二、内容提要

铁碳合金是工业中应用最广泛最重要的工程材料，铁碳相图是研究铁碳合金的成分、相和组织及其性能之间关系的重要工具。本章是本课程的重点，要求熟练掌握下列内容。

① 熟记铁碳相图，能默画出铁碳相图，记住重点点的温度、成分和意义（B、C、E、F、P、S 点）以及一些重要线的意义（ECF、PSK、GS、ES 线）。

② 弄清铁碳合金中的基本相和基本组织的本质和特征。

固态下，铁碳合金中的基本相有高温 δ 铁素体、铁素体、奥氏体和渗碳体四种，前三种属于固溶体，后者属于化合物。固溶体具有好的塑性和韧性，而化合物的硬度高脆性大。

由基本相所形成的铁碳合金的基本组织有铁素体、奥氏体、渗碳体（一次、二次、三次渗碳体之分）、珠光体、莱氏体（有低温与高温莱氏体之分）5 种。其特点归纳列于表 1-1-5、表 1-1-6。

③ 运用铁碳相图，分析典型成分的铁碳合金的结晶过程（用冷却曲线表示），计算平衡组织中组成相及组织组成物的相对质量，参见表 1-1-7。

④ 熟练画出铁碳合金室温平衡组织示意图，正确标出各组织组成物，熟悉各种组织的特征。如：过共析钢（T12 钢）室温平衡组织为 $P + Fe_3C_{II}$ ，其组织特征是白色网状 Fe_3C_{II} 包围在层片状 P 周围，组织示意图见图 1-1-3。

⑤ 铁碳合金的成分-组织-性能之间的关系。对于亚共析钢，根据碳含量可求出组织组成物的相对质量，进而可估算其性能（强度、硬度、塑性）。

⑥ 各种碳钢的编号及应用。

⑦ 弄清一些重要概念：同素异构转变、 α -Fe、铁素体、

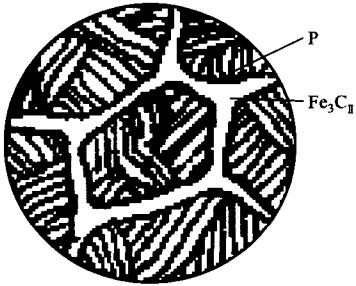


图 1-1-3 过共析钢组织示意图

奥氏体、珠光体、低温莱氏体、共析渗碳体、二次渗碳体。

为了深入理解和熟练掌握本章内容，配合讲课将安排一次课堂讨论和一次实验。

表 1-1-5 铁碳合金中的基本组织

名称	符号	晶体结构	组织类型	定 义	w(C)/%	存在温度范围/℃	组织形态特征	主要力学性能
铁素体	F	bcc	间隙固溶体	C 溶于 α-Fe 中	≤0.0218	≤912	块状、片状	塑、韧性良好
奥氏体	A	fcc	间隙固溶体	C 溶于 γ-Fe 中	≤2.11	≥727	块状、粒状	塑、韧性良好
渗碳体	一次 C _{mI}	具有复杂晶格的金属化合物	间隙化合物	从 L 中首先结晶出	6.69	≤1227	粗大片、条状	硬而脆
	二次 C _{mII}			从 A 中析出		<1148	网状	硬而脆(耐磨性提高,但强度明显下降)
	三次 C _{mIII}			从 F 中析出		<727	片状(断续)	增加脆性,降低塑性
珠光体	P	两相组织	机械混合物	F+Fe ₃ C	0.77	≤727	层片状(或粒状)	良好的综合力学性能(强度较高,具有一定的塑韧性)
莱氏体	高温 L _d	两相组织	机械混合物	A+Fe ₃ C	4.3	727~1148	点状、短杆状或鱼骨状	硬而脆
	低温 L _{d'}	两相组织	机械混合物	P+Fe ₃ C _{II} +Fe ₃ C		≤727	点状、短杆状或鱼骨状	硬而脆

表 1-1-6 铁碳合金中的渗碳体

名 称	符号	母相	形成温度/℃	组织形态	分布情况	对性能的影响
一次渗碳体	Fe ₃ C _I	L	>1148	粗大板条状	在莱氏体上	增加硬脆性
二次渗碳体	Fe ₃ C _{II}	A	727~1148	网状	在 A 或 P 晶界上	严重降低强度和韧性
三次渗碳体	Fe ₃ C _{III}	F	<727	短条状	数量极少(沿晶界)	降低塑性(常忽略不计)
共晶渗碳体	Fe ₃ C _{共晶}	Lc	1148	块、片状	是莱氏体的基本相	产生硬脆性
共析渗碳体	Fe ₃ C _{共析}	As	727	细片状	与片状 F 构成层片状 P	提高综合力学性能

表 1-1-7 铁碳合金的分类、相组分与组织组分的计算

Fe-C 合金	组 织	相 组 成		组织组成物	
纯铁	F	F	100%	F	100%
亚共析钢	F+P	F, Fe ₃ C	$Fe_3C\% = \frac{C}{6.69} \times 100\%$ $F\% = 1 - Fe_3C\%$	F, P	$P\% = \frac{C}{0.77} \times 100\%$ $F\% = 1 - P\%$
共析钢	P			P	100%
过共析钢	P+ Fe ₃ C _{II}			P, Fe ₃ C _{II}	$Fe_3C_{II}\% = \frac{C-0.77}{6.69-0.77} \times 100\%$ $P\% = 1 - Fe_3C_{II}\%$
亚共晶白口铸铁	Fe ₃ C _{II} + L _{d'}			P, Fe ₃ C _{II} , L _{d'}	$L_{d'}\% = \frac{C-2.11}{4.3-2.11} \times 100\%$ $Fe_3C_{II}\% = \frac{2.11-0.77}{6.69-0.77} \times (1 - L_{d'}\%)$ $P\% = 1 - L_{d'}\% - Fe_3C_{II}\%$
共晶白口铸铁	L _{d'}			L _{d'}	100%
过共晶白口铸铁	L _{d'} + Fe ₃ C _{II}			Fe ₃ C _{II} , L _{d'}	$Fe_3C_{II}\% = \frac{C-4.3}{6.69-4.3} \times 100\%$ $L_{d'}\% = 1 - Fe_3C_{II}\%$